

Prins Maurits Laboratorium TNO

TNO-Defensieonderzoek

TD 92-2751

TNO-rapport
PML 1992-113

maart 1993
Exemplaar nr. 1

DTIC
SELECT
JUL 14 1993
S B D

Snelheidsmetingen aan
de TNO - Mega Ampère Pulser (TNO-MAP)

Approved for public release
Distribution Unlimited

AD-A266 801

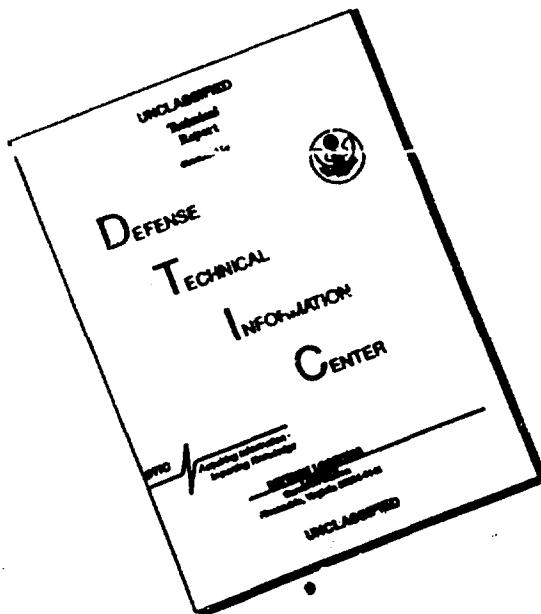
TNORAP/9300 8780

187

TDCK RAPPORTENCENTRALE
Frederikkazerne, gebouw 140
v/d Burchlaan 31 MPC 16A
TEL. : 070-3166394/6395
FAX. : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag *TDCK*

TD 92-2751

DISCLAIMER NOTICE



THIS DOCUMENT IS BEST
QUALITY AVAILABLE. THE COPY
FURNISHED TO DTIC CONTAINED
A SIGNIFICANT NUMBER OF
PAGES WHICH DO NOT
REPRODUCE LEGIBLY.

TNO-Defensieonderzoek

TNO-rapport
PML 1992-113
maart 1993
Exemplaar no. 1

SELIC
JUL 14 1993
S B D

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Fax 015 - 84 39 91
Telefoon 015 - 84 28 42

Snelheidsmetingen aan
de TNO - Mega Ampère Pulser (TNO-MAP)

Approved for public release
Distribution Unlimited

Auteur(s):

M.P. van Rooijen

TNO opdrachtnummer:

A84/KL/147

Rubriceringen

Rubricering bepaald door

Ing. J.A. van Gool

Rubriceringsdatum:

12-02-1993

TDCK RAPPORTENCENTRALE
Frederikkazerne, gebouw 140
v/d Burchlaan 31 MPC 16A
TEL. : 070-3166394/6395
FAX. : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag 

Alle rechten voorbehouden

Naets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
vooraanstaande toestemming van TNO

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks
opdrachten aan TNO, dan wel de
betroffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan

Rapport:

ONGERUBRICEERD

Titel:

ONGERUBRICEERD

Samenvatting:

ONGERUBRICEERD

Bijlage(n):

ONGERUBRICEERD

Oplage:

20

Aantal pagina's:

(incl. bijlagen, excl. distr. lijst en RDP)

42

Aantal bijlagen:

1

TNO



Samenvatting

In de periode '89-'91 is bij PML-TNO een Mega Ampère Pulser (MAP) ontwikkeld. Hiermee is het mogelijk kleine kunststof plaatjes (flyers) te versnellen tot snelheden in het bereik van 4-9 km/s. Tijdens de ontwikkeling is veel geëxperimenteerd met de opbouw van de Flyer Plate Assembly (FPA), het geheel dat zorgt voor de voortstuwing van de flyer. Door de snelheid en vlakheid van de flyer te meten is onderzocht welke factoren invloed hebben op de beweging van de flyer. Vooral de opsluiting van het plasma na de explosie, de gebruikte lijmtechnieken en het principe van de snelheidsmeting zijn factoren die de vlucht van de flyer negatief kunnen beïnvloeden. Aan de hand van de resultaten van deze metingen is een voorstel gedaan voor een nieuw type FPA waarmee nu een nieuwe snelheidscalibratie moet worden uitgevoerd.

Summary

During the period 1989-1991 at PML-TNO a Mega Ampère Pulser was developed. This instrument is capable of accelerating thin flat plastic plates to velocities ranging 1-10 km/s. Extensive research was conducted on the construction of the Flyer Plate Assembly (FPA), the system that launches the flyer. The influence of different parameters on the flyer movement was examined by measuring velocity and flatness of the flyer. The confinement of the plasma after explosion, the construction techniques of the FPA and the method of measuring the velocity are the main causes for a disturbed flyer movement. Based on the experimental results, a new FPA is proposed for which a new velocity calibration is needed.

Accession For	
NTIS CRA&I	<input checked="" type="checkbox"/>
DTIC TAB	<input type="checkbox"/>
Unannounced	<input type="checkbox"/>
Justification	
By	
Distribution/	
Availability Codes	
Print	Avail and/or Special
A-1	

93-15898



INHOUDSOPGAVE

	SAMENVATTING/SUMMARY	2
	INHOUDSOPGAVE	3
1	INLEIDING	5
2	DE MEGA AMPÈRE PULSER	6
2.1	Elektrisch schema	6
2.2	Werking van de MAP	8
2.3	De Flyer Plate Assembly (FPA)	9
3	OPZET VAN DE METINGEN	11
3.1	De differentiaalstroommeting	11
3.2	Stroommetingen	12
3.3	Snelheidsmetingen	14
3.4	Vlakheidsmetingen	18
4	RESULTATEN	18
4.1	Specific Action	23
4.2	Opsluiting van het plasma	25
4.3	Gurney Energy	28
4.4	Resultaten van de snelheidsmetingen	31
4.5	Resultaten van de vlakheidsmetingen	32
5	DISCUSSIE	33
5.1.	Verbeteringen aan de FPA	33
5.2	Verbeteringen aan de snelheidsmeting	35

6	CONCLUSIES	36
7	ONDERTEKENING	37
8	LITERATUUR	38
BIJLAGE 1 OVERZICHT VAN DE MEETRESULTATEN		

1 INLEIDING

In de periode 1990-1992 is bij PML-TNO een Mega Ampère Pulser (MAP) ontwikkeld. Met dit apparaat kunnen kleine stukjes kunststof (flyers) in een zeer korte tijd versneld worden tot 10 km/s. Hiermee is een wijd scala aan onderzoek mogelijk waarbij hoge drukken (tientallen GPa) of hoge snelheden nodig zijn. Enkele onderzoeks mogelijkheden van de MAP zijn: initiatie van (zeer ongevoelige) explosieve stoffen, hugoniot metingen in het gebied tot 50 GPa of zelfs onderzoek naar het destructieve effect van micrometeorieten.

Voor al deze onderzoeken is het noodzakelijk om de flyer met een exact gedefinieerde snelheid op het te onderzoeken object te laten botsen. Daarom is het noodzakelijk een goed inzicht te hebben in het effect van de verschillende systeemparameters op de snelheid van de flyer. Dit rapport handelt dan ook over de verbanden van verschillende systeemparameters en hun invloed op de flyersnelheid¹⁾.

In het tweede hoofdstuk wordt een korte introductie gegeven over de MAP, zoals deze bij het PML-TNO operationeel is. Het elektrische circuit, de werking en de opbouw van de Flyer Plate Assembly (het systeem dat zorgt voor de versnelling van de flyer) komen hierin aan de orde.

In het daaropvolgende hoofdstuk wordt de experimentele opzet uitvoerig toegelicht. De verschillende metingen met hun principes, hun doel en hun beperkingen komen hierin aan de orde. Tevens wordt besproken hoe de meetgegevens vertaald worden naar de gewenste informatie.

Hoofdstuk 4 is een besprekking van de uitgevoerde experimenten waarbij verschillende parameters zijn gevarieerd. Hiervan wordt het effect op de flyersnelheid bepaald. In dit hoofdstuk wordt ook de vlakheid van de flyer besproken. Voor alle toepassingen van de MAP is het belangrijk dat de flyer vlak vliegt, dat wil zeggen dat deze niet naar een kant mag overhellen of een ernstige vervorming mag hebben.

In het op één na laatste hoofdstuk wordt besproken wat er aan de Flyer Plate Assembly en de meetmethode moet worden veranderd om tot nog betere resultaten te komen.

Het laatste hoofdstuk bevat de conclusies. Op basis van de resultaten van de metingen wordt een ontwerp van een nieuwe FPA voorgesteld waarin alle eisen zijn verwerkt die noodzakelijk zijn voor de gewenste reproduceerbaarheid.

¹⁾ Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van de opdracht detonatieketen (A84/KL/147)

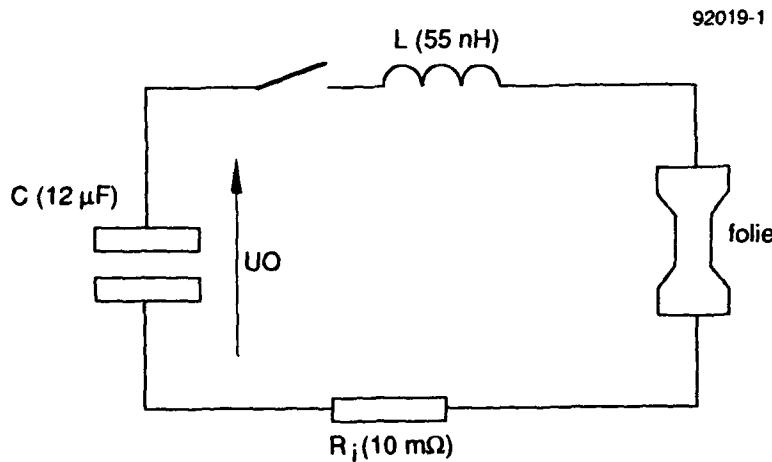
2 DE MEGA AMPÈRE PULSER

De MAP versnelt kleine kunststof plaatjes (flyers) tot snelheden tot 10 km/s. Dit wordt bewerkstelligd door een zeer grote stroom (tot 550 kA) in een zeer korte tijd door een zeer dun metaalfolie te sturen. Als gevolg van deze stroom explodeert het metaalfolie. Als op dit metaalfolie een kunststof plaatje geplaatst is wordt dit plaatje door de expanderende metaaldampen voortgestuwd. Dit voortgestuwde plaatje wordt door een gat gestansd waardoor het gevormd wordt tot een flyer dat zich voortbeweegt met enkele kilometers per seconde.

In dit hoofdstuk worden de elektrische aspecten van de MAP slechts kort beschreven. Voor een meer uitgebreide beschrijving hiervan wordt verwezen naar [1]. In onderstaand hoofdstuk worden nog kort enkele voor dit rapport belangrijke elektrisch aspecten toegelicht. Uitgebreid wordt er ingegaan op de opbouw van de Flyer Plate Assembly, het geheel dat zorgt voor de folie-explosie en het daaruit voortvloeiende versnellen van de flyer.

2.1 Elektrisch schema

Een vereenvoudigd schema van de MAP schakeling is gegeven in figuur 1. In feite is de MAP niet meer dan een RLC kring waarin R_1 en L respectievelijk de weerstand en de inductie in de leidingen, condensatorbank en de schakelaar van het systeem zijn.



Figuur 1 Het elektrisch schema van de MAP

De condensator C wordt opgeladen met een spanning van 25-40 kV. Op het moment dat schakelaar S wordt gesloten, wordt het systeem door de lage waarden van de weerstand R_i en de inductie L als het ware kortgesloten. Hierdoor gaat een zeer grote stroom lopen. Door ervoor te zorgen dat het folie de grootste weerstand in het systeem heeft zal daar het meeste vermogen gedisipeerd worden. Hierdoor zal de folie-explosief verdampen.

Voor het systeem geldt de differentiaalvergelijking die is gegeven in (1):

$$U_0 = \frac{1}{C} \int I(t) \cdot dt + L \cdot \frac{dI}{dt} + I(t) \cdot R(t) \quad (1)$$

In het geval van de MAP is alleen het zwak ondergedempte systeem van belang, omdat dan een maximale stroom-output wordt verkregen. De oplossing van de differentiaal vergelijking wordt dan (2):

$$I(t) = \frac{U_0}{L \cdot \omega} \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Waarbij geldt dat:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_i^2}{4L^2}} \quad \tau = \frac{2L}{R_i} \quad (3)$$

met: U_0 = De opladspanning van de condensator

R_i = De totale weerstand van het systeem

L = De totale inductie van het systeem

C = De capaciteit van de condensator

Een andere belangrijke parameter is de stijgtijd van de stroom in het systeem dat wordt gegeven door (4). Hieruit blijkt dat de inductie van het systeem bepalend is voor de stijgtijd van de stroom.

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{t=0} = \frac{V_0}{L} \quad (4)$$

Bij het ontwerpen van de MAP is ervoor gezorgd dat het systeem een lage inductie heeft. De karakteristieke waarden voor de MAP bij het PML-TNO zijn:

Tabel 1 Karakteristieke waarden voor de TNO MAP

C	[μ F]	11.8
L	[nH]	50
R_i	[m Ω]	9
U_0	[kV]	25-40
I_{max}	[kA]	250-550
dI/dt_{max}	[TA/s]	0.8

2.2 Werking van de MAP

Het expanderend metaaldamp van het exploderende metaalfolie zorgt voor de versnelling van de flyer. Deze metaalfolie-explosie wordt opgewekt door een capacitive ontlading door het metaalfolie. Door de relatief grote ohmse weerstand van het metaalfolie stijgt de temperatuur zeer snel. De stroomtoename door het folie moet zodanig groot zijn dat de vloeibare fase geen tijd heeft om te vervloeien en een stroomonderbreking veroorzaakt.

De beste resultaten worden verkregen als de vloeibare folie-fase wordt oververhit zodat een explosieachtige verdamping plaats vindt. De expanderende gassen worden gebruikt om een laagje kunststof, dat op het metaalfolie is gepositioneerd te versnellen.

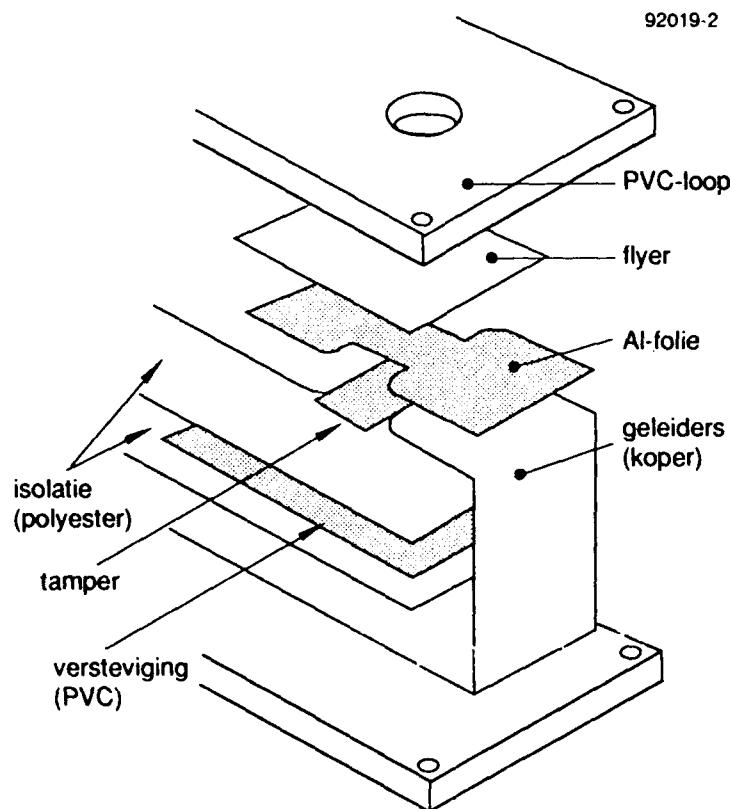
Bij grotere stromen wordt ook de invloed van elektromagnetische krachten steeds groter: deze zorgen voor een verdere versnelling van de flyer. Dit wordt besproken in paragraaf 2.3.

2.3 De Flyer Plate Assembly (FPA)

Het exploderende metaalfolie wordt gebruikt als aandrijving van een stukje kunststof, de flyer. Het geheel wat zorgt voor de omzetting van de elektrische energie in de bewegingsenergie is de Flyer Plate Assembly. Om een optimale voortstuwing te krijgen van deze flyer is de geometrie van de Flyer Plate Assembly bijzonder belangrijk. Deze moet immers verschillende functies vervullen:

- De stroomverdeling in het folie moet homogeen zijn zodat deze in zijn geheel explodeert. Bij een niet homogene stroomverdeling zal door de niet-gelijkijdige explosie van het folie op bepaalde plekken een sterk verhoogde druk zijn waardoor de flyer kan gaan scheef vliegen of zelfs beschadigen.
- Het plasma wat ontstaat na de explosie moet goed opgesloten zitten waardoor zoveel mogelijk energie van het plasma wordt omgezet in bewegingsenergie. Als het plasma zich in alle richtingen kan expanderen zal er veel energieverlies zijn waardoor er lagere flyersnelheden worden gehaald.
- De hoge stromen moeten enkel door het folie lopen. Daarom moet de FPA ook een isolerende werking hebben om overslag over het folie of overslag naar omliggende componenten te voorkomen.
- Op het moment dat de flyer gaat vliegen moet deze uitgestansd worden zodat een mooi gevormde flyer ontstaat. Hiertoe moet een kunststof loop op het flyermateriaal worden geplaatst waardoor de flyer gevormd wordt.

Verkeerd gekozen geometrische eigenschappen van de Flyer Plate Assembly kunnen leiden tot snelheidsverlies, beschadigingen aan, en scheef vliegen van de flyer [2].



Figuur 2 Opbouw van de flyer plate assembly

Na een inleidend literatuur onderzoek is gekozen voor de Flyer Plate Assembly zoals getoond in figuur 2. Twee stroken koperfolie (200 mm x 40 mm x 0.1 mm) zorgen voor de stroomaavoer. Hiertussen bevindt zich het metaalfolie, in ons geval aluminium. De afmetingen van het aluminium dat zich tussen de koperbanen bevindt kan gevarieerd worden. Over het aluminium wordt met een epoxylijm het flyermateriaal, kapton gelijmd. Kapton is een goede isolator en is relatief ongevoelig voor hoge temperaturen. Ook de dikte van het kapton kan gevarieerd worden. Aan de onderzijde van het metaalfolie bevindt zich eveneens een laag kapton. Deze laag, de tamper (aambeeld) genaamd, zorgt ervoor dat de naar beneden gerichte energie van het exploderende folie wordt gereflecteerd en zo ten goede komt aan de versnelling van de flyer.

Een van de koperbanen wordt omgebogen, zodat er een aansluitmogelijkheid bestaat op de koperen aansluitplaten van de MAP opstelling. Deze teruglopende koperbaan heeft nog een tweede functie. Door de grote stromen die er door deze koperbanen lopen (tot 550 kA) zijn de Lorentzkrachten die er in dit systeem werken zeer groot. Op het moment dat het folie verdampft zal er nog steeds een

str om door het metaalplasma blijven lopen. De Lorentzkracht die er op dit plasma werkt geeft een grote bijdrage in de versnelling van de flyer [6].

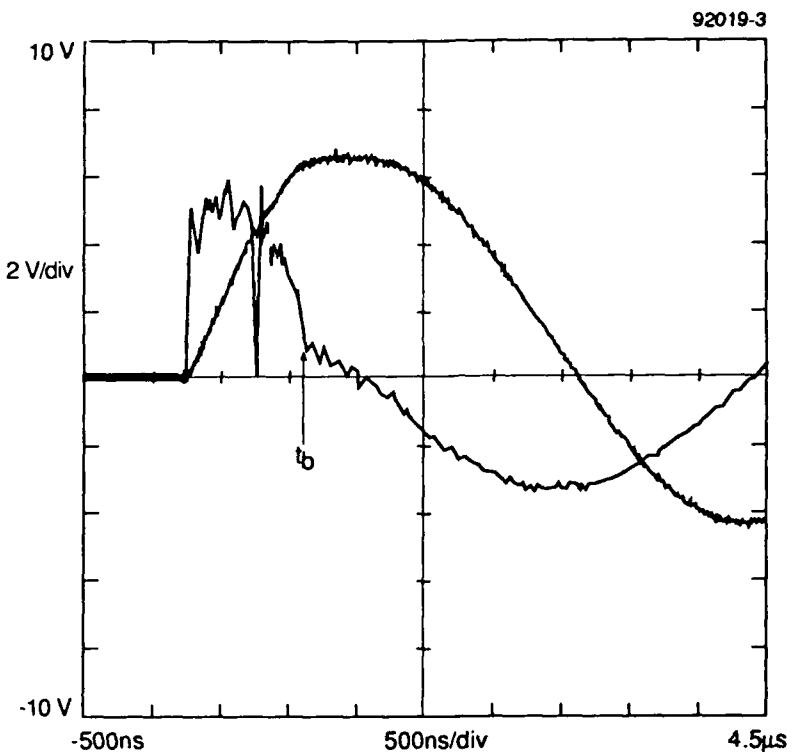
Tussen de koperbanen wordt ter versteviging een PVC plaatje en ter isolatie polyesterfolie aangebracht. Dit geheel wordt tussen twee PVC platen geklemd die ook weer als versteviging dienen. De bovenste PVC plaat heeft twee concentrische gaten recht boven het aluminiumfolie waarop het kapton gelijmd is. Het doorgaande gat, de loop, bepaalt de dimensies van de flyer die door de folie-explosie en de elektromagnetische krachten uit het kapton gestansd wordt. De hoogte van dit gat bepaalt de door de flyer afgelegde weg. Het bovenste, bredere gat dient voor de bevestiging van de te onderzoeken materialen of meetfibers.

3 OPZET VAN DE METINGEN

Tijdens de verschillende experimenten worden meerdere parameters gemeten. Om te kunnen bepalen of de verdamping van het aluminiumfolie efficiënt verloopt moeten een stroommeting en een differentiaalstroommeting worden uitgevoerd. De eerste ter bepaling van de grootte van de stroom die loopt tijdens de explosie van het folie, de tweede ter bepaling van het moment van exploderen. Verder wordt de beweging van de flyer gemeten. Dit wordt uitgevoerd door middel van snelheids- en vlakheidsmetingen. De principes van deze metingen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

3.1 De differentiaalstroommeting

De differentiaalstroommeting, ofwel dI/dt , wordt toegepast om het moment van exploderen van het folie te bepalen. Tijdens de faseovergang van het aluminium naar de plasma-fase zal de weerstand van het folie plots zeer sterk toenemen. Daardoor zal de stroomtoename ook ineens anders verlopen. Dit is waar te nemen in de dI/dt meting. Een voorbeeld van een dergelijke meting is opgenomen in figuur 3.



Figuur 3 Stroom- en differentiaalstroommeting tijdens een 25 kV experiment

Het buigpunt van de dI/dt is aangeduid met t_b , het moment van exploderen van het folie.

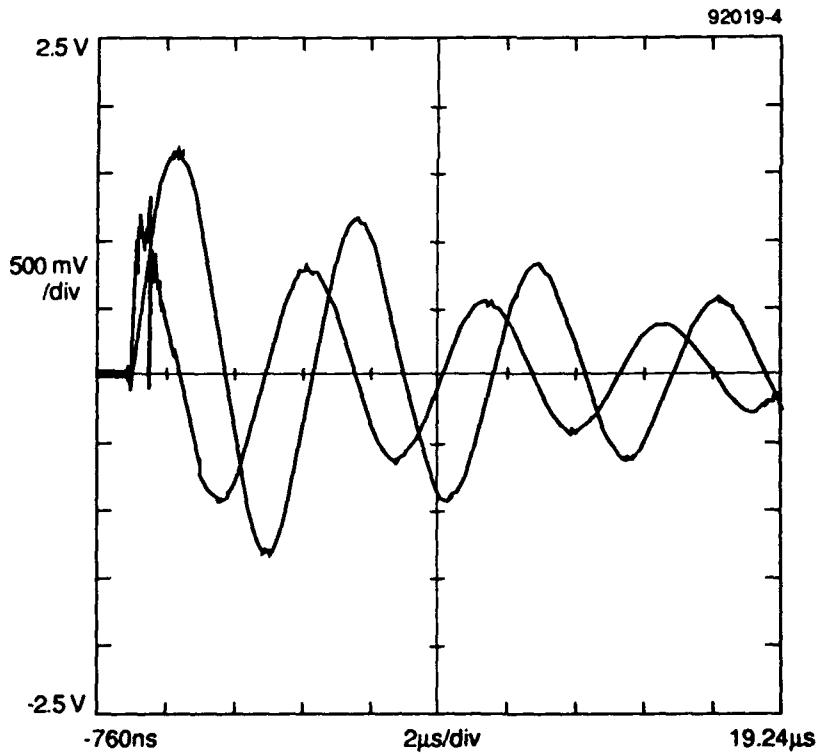
De differentiaalstroom wordt gemeten met een Rogowskispoel. Deze wordt onder de stroomvoerende koperbaan gehangen. Het magnetisch veld, opgewekt door de stroom in de koperbanen, wekt een spanning in de Rogowskispoel op. De spanning die deze spoel afgeeft is evenredig met de afgeleide van de stroom [7]. Dit signaal wordt (evenals de andere besproken signalen) geregistreerd op twee Tektronix DSA 602 Digital Signal Analyzers (1 ns resolutie). Voor het omzetten van dit signaal naar de absolute waarde moet de inductie L bekend zijn zodat met (4) op $t=0$ s de vermenigvuldigingsfactor bepaald kan worden. Het bepalen van L geschiedt met behulp van de stroommeting zoals hieronder wordt beschreven.

3.2 Stroommetingen

Om de weerstand van het elektrisch circuit van de MAP niet te verstören is voor het meten van de stroom gekozen voor een stroomlus. Deze wordt onder de stroomgeleider die de bunker in loopt gehangen. Het magnetisch veld dat door de primaire stroom in de geleider wordt opgewekt zorgt ervoor dat er in de stroomlus een secundaire stroom gaat lopen. Deze stroom wordt met een stroomdetector (Pearson Electronics Model 411) gemeten. Een resultaat van een dergelijke stroommeting wordt ook getoond in figuur 3.

Voor het bepalen van de probefactor (voor het omzetten van de uitgangsspanning van de stroomdetector naar de werkelijk stroom) moet een inducietoetsing worden uitgevoerd. Hiermee worden de parameters ω , τ , R en L uit (2) bepaald. Hiertoe wordt in plaats van de FPA het circuit kortgesloten met een koperbaan (breedte 40 mm, dikte 200 μm). Nu zal de weerstand van het circuit niet veranderen tijdens de ontlading van de condensatoren. Deze meting wordt uitgevoerd bij maximaal 25 kV omdat anders de voltage reversal percentage van de condensatoren overschreden wordt en de stroom te groot wordt. Dat wil zeggen dat er weer te veel energie terugvloeit op de condensatorplaten tijdens de oscillerende ontlading.

De gemeten stroomcurve (figuur 4) wordt gefit op (2). Daaruit worden de parameters gevonden waarmee de probefactor bepaald wordt.



Figuur 4 Inductiometing in kortgesloten circuit bij 25 kV

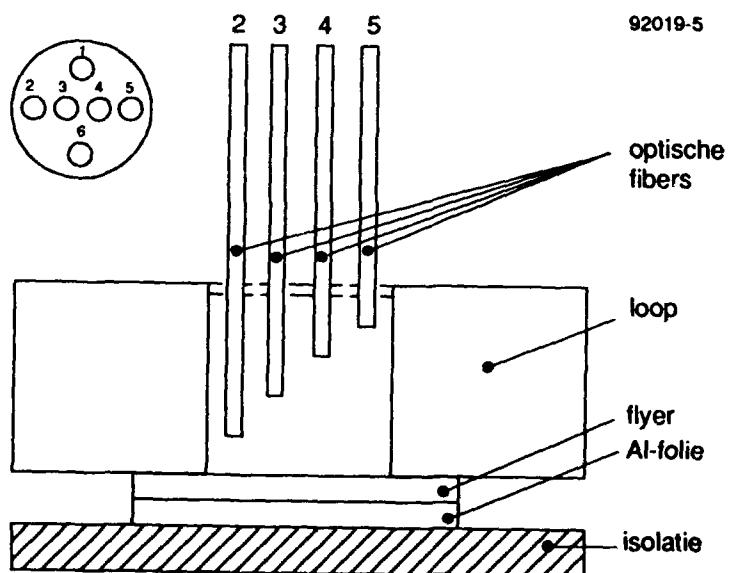
Uit de stroommetingen worden verder nog de volgende gegevens gehaald:

- maximale stroom (I_{max}) en;
- minimale stroom (I_{min});
- stroom op het moment van explosie (I_b);
- geïntegreerde kwadratische stroom tot het moment van explosie. (I^2t). Hiermee wordt de ingevoerde energie gemeten.

De hierboven besproken meetgegevens worden bepaald bij elke proef. De in de volgende paragrafen besproken gegevens worden gemeten om de beweging van de flyer te beschrijven. Tijdens één experiment wordt of de snelheid of de vlakheid van de flyer bepaald.

3.3 Snelheidsmetingen

Voor het bepalen van de flyersnelheid worden 6 fibers (Ensign Bickford, HCS 200 Optical Fiber) gebruikt. Deze worden in een PVC plaatje gelijmd zodat ze gefixeerd in de loop kunnen hangen. De lengtes van de fibers zijn voor een meting opgemeten onder een lichtmircoscoop (nauwkeurigheid: $\pm 5 \mu\text{m}$). Het principe van de snelheidsmeting wordt weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Principe van een snelheidsmeting

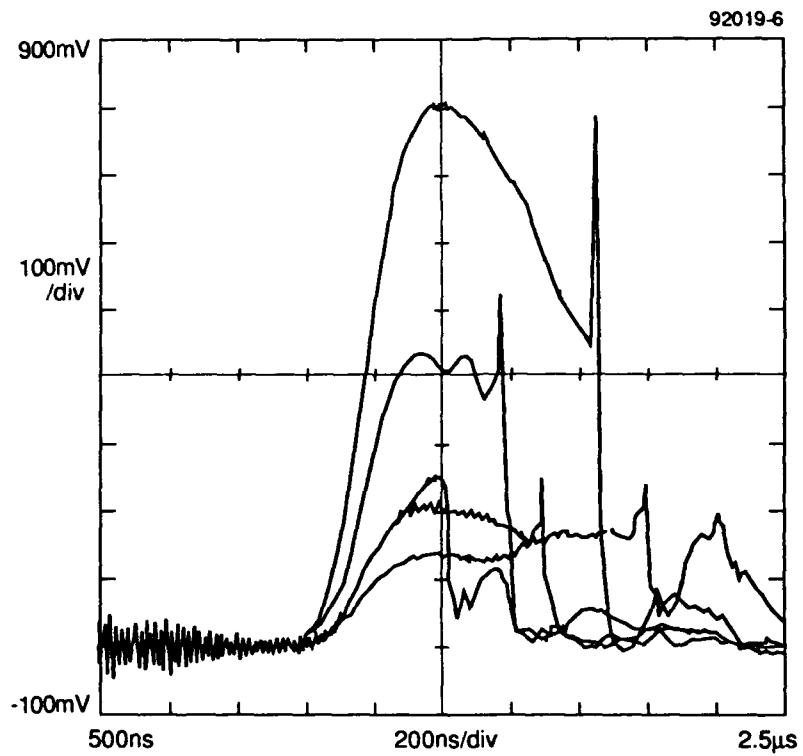
Op het moment dat het metaalfolie-explosief verdampst zal er veel licht vrijkomen dat door het kapton heen straalt en in de fibers wordt opgevangen. Door de druk van de explosie en de elektromagnetische krachten wordt de flyer de loop in geschoten. Bij hogere snelheden van de flyer wordt de lucht vóór de flyer geïoniseerd en gaat deze luchtlag licht uitzenden. Het licht achter de flyer, afkomstig van het exploderende folie wordt dan tegengehouden door deze geïoniseerde laag.

Vlak vóór het moment dat de flyer een fiber treft wordt de lucht die zich hiertussen bevindt nog eens extra geïoniseerd door de plaatselijke drukverhoging. Dit veroorzaakt een extra lichtpiek op het waargenomen licht afkomstig van de al eerder geïoniseerde luchtlag voor de flyer [8].

Op het moment dat de fiber getroffen wordt verandert de dichtheid van de fiber zodanig dat er geen licht meer wordt doorgelaten. Hierdoor ontstaat de karakteristieke lichtsignaal zoals weergegeven in figuur 6.

Dit lichtsignaal wordt met een Fiber Optic Receiver (Hewlett Packard HFBR-2406) omgezet naar een analoog-elektrisch signaal dat op twee 6-kanaals digitale oscilloscopen (Tektronix DSA 602) wordt opgenomen.

Een voorwaarde bij deze meting is wel dat de beweging van de flyer niet verstoord wordt door de botsing met de fibers. Aan deze voorwaarde wordt voldaan omdat de fiber-doorsneden in verhouding tot het flyer oppervlak zeer klein zijn en de snelheid van de flyer zeer groot is.



Figuur 6 Resultaat van een snelheidsmeting

Omdat de weg die de flyer vanuit de startpositie tot de fiber aflegt bekend is kan hieruit met de gemeten tijden een plaats-tijd relatie worden afgeleid. Voor het bepalen van de snelheid van de flyer aan het einde van de loop wordt er uitgegaan van de volgende versnellingsrelatie:

$$a(t) = a_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Voor de snelheid en de verplaatsing volgt daaruit:

$$v(t) = a_0 \cdot \tau \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

$$x(t) = a_0 \cdot \tau \cdot \{t - \tau (1 - e^{-t/\tau})\} \quad (7)$$

Uit de meetgegevens en deze laatste vergelijking worden de parameters a_0 en τ bepaald. Vervolgens wordt de snelheid aan het einde van de loop ($v_5\text{mm}$) bepaald met (6).

Deze methode heeft enkele beperkingen:

- Het maximale aantal van 6 meetpunten bij de snelheidsmeting beïnvloedt de nauwkeurigheid in belangrijke mate. De fout in de fit zal altijd vrij groot zijn, omdat de flyer over het algemeen niet gelijkmataig maar 'schokkend' wordt versneld. Dit wordt veroorzaakt door de schokgolf in de flyer die opgewekt is door de folie-explosie. Doordat deze schokgolf weerkaatst wordt op de overgang van het flyermateriaal naar de lucht zal deze heen en weer blijven lopen. Dit is waar te nemen met een Fabry-Perot snelheidsmeter [9].
- De positionering van de fibers in de loop is beperkt tot het gebied van 1.5 mm tot 5.0 mm. Onder 1.5 mm heeft de flyer een te lage snelheid waardoor de beweging van de flyer verstoord kan worden door de botsing met de fibers. Hierdoor is het moeilijk te bepalen wanncer de flyer begint te bewegen.
- voor de bepaling van de verplaatsing wordt er van uitgegaan dat de flyer begint te bewegen op het moment dat het folie explodeert. De flyer verplaatst zich echter al eerder onder invloed van de Lorentzkrachten. Deze verplaatsing kan 0.4 mm bedragen [6].
- Voor het bepalen van de flyersnelheid aan het einde van de loop (5 mm) moet de verplaatsingsrelatie geëxtrapoleerd worden. Ook dit beperkt de nauwkeurigheid van de bepaalde eindsnelheid.

Ondanks deze beperkingen en het ontbreken van alternatieven wordt er toch gebruik gemaakt van deze techniek om de snelheid van de flyer te bepalen. De in de volgende hoofdstukken besproken snelheden van de individuele metingen zijn met deze methode bepaald. De nauwkeurigheid van deze snelheid is (nog) niet in een getalswaarde uit te drukken. Deze snelheden moeten dan ook gezien worden als een goede indicatie van de bereikte eindsnelheden, maar een foutenanalyse kan er nog niet van worden gemaakt.

3.4 Vlakheidsmetingen

Het principe van een vlakheidsmeting is bijna gelijk aan dat van een snelheidsmeting. De fibers worden nu echter allemaal op dezelfde hoogte aan het einde van de loop geplaatst. Door de tijdsverschillen te meten waarmee de fibers getroffen worden, wordt er een beeld verkregen over de vlakheid van de flyer.

Hiertoe worden de verschillende aankomsttijden van de flyer op de verschillende fibers gemeten. Doordat bij dezelfde configuratie ook snelheidsmetingen worden uitgevoerd is de snelheid van de flyer op het moment dat deze de fiber treft bekend. Met behulp van deze snelheid en de verschillende aankomsttijden wordt er berekend hoezeer de flyer vervormd is. Dit wordt uitgedrukt in een afstand. Bij de uitgevoerde vlakheidsmetingen zijn de fibers telkens op een afstand van 5.0 mm in de loop geplaatst (het einde van de loop).

4 RESULTATEN

Tijdens de ontwikkeling van de MAP is er veel geëxperimenteerd met verschillende FPA's om een inzicht te verkrijgen in de invloed van de verschillende parameters op de eindsnelheid van de flyer [10]. Hieronder volgt een chronologisch overzicht van de aanpassingen die zijn uitgevoerd teneinde een betere meting te verkrijgen. Voor de resultaten van deze metingen wordt verwezen naar bijlage 1.

IMP001 - IMP014

Deze metingen zijn uitgevoerd met de FPA zoals beschreven in paragraaf 2.3. De lengtes van de fibers zijn hier echter nog met een schuifmaat bepaald. Er werd gewerkt met kunststof fibers die veel arbeids-intensiever (polijsten) zijn dan de nu gebruikte glas-fibers. De dimensies van het aluminium zijn gevarieerd om het effect hiervan op de eindsnelheid te onderzoeken. De gebruikt dimensies van het aluminiumfolie zijn in onderstaande tabel vermeld.

Tabel 2 Dimensies van de gebruikte FPA en het spanningsbereik

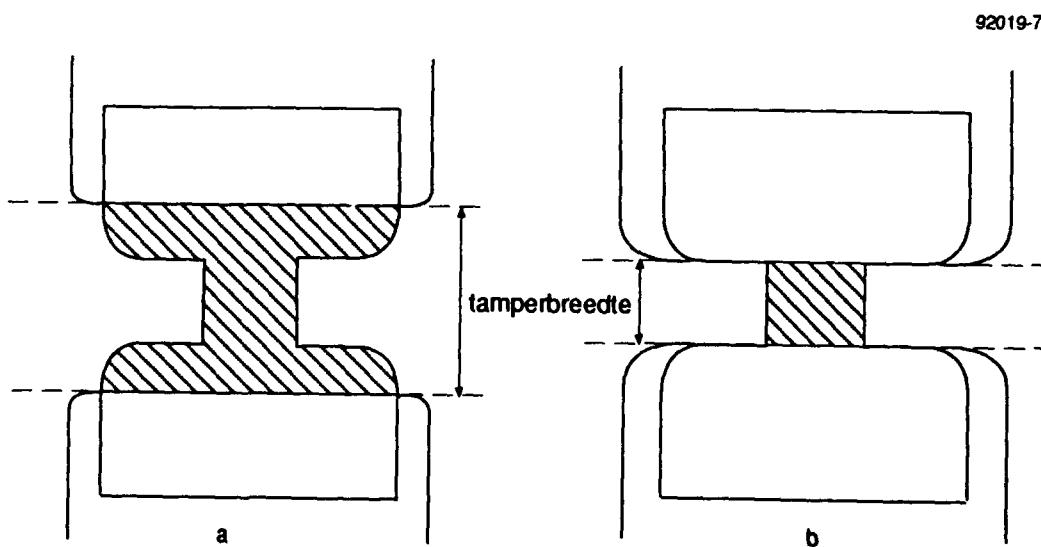
aluminium breedte	aluminium dikte	diameter loop	spanningsbereik
11.0 mm	60 μ m	8.9 mm	25,30,35 kV
16.0 mm	30 μ m	13.8 mm	25,30 kV
16.0 mm	60 μ m	13.8 mm	25,30,35 kV

IMP015 - IMP022

Metingen uitgevoerd met dezelfde FPA als voorgaande experimenten. Er wordt nu gebruik gemaakt van de glas-fibers waarvan de lengtes onder een lichtmicroscoop bepaald worden. Hierdoor wordt de nauwkeurigheid van de metingen groter. De dimensies van het gebruikte aluminium bedragen hier (en ook in de rest van de experimenten): breedte 11.0 mm; dikte 60 μ m; loop 8.9 mm.

IMP023 - IMP025

Drie experimenten die zijn uitgevoerd om het effect van de grootte van de tamper op de explosie van het aluminium te onderzoeken. De tamper (aambeeld) is onder het aluminium geplaatst. In de eerste experimenten (IMP001-IMP022) is de tamper breder gemaakt dan de aluminium brug (het exploderende gedeelte van het folie) om er zo voor te zorgen dat alle energie, afkomstig van de folie-explosie, goed gereflecteerd wordt (figuur 7a). Bij onderzoek van de restanten van de folie-explosie blijkt echter dat er hierdoor 'te veel' aluminium explodeert. Dit wordt weergegeven door het gearceerde gebied. Doordat er een stuk aluminium over het koper uitsteekt explodeert dit gedeelte van de brug mee. Omdat het geen contact met het koper heeft zal dit gedeelte van het aluminium moeilijker zijn warmte afvoeren waardoor de temperatuur veel sneller zal stijgen. Verder zal de stroom door het aluminium, als deze niet op een koperbaan ligt, veel groter zijn waardoor ook de temperatuur snel zal toenemen. Uit deze proeven werd dan ook geconcludeerd dat alleen dat gedeelte van de brug dat moet exploderen geen contact mag hebben met het koper. Hierbij moet dus de tamperbreedte hetzelfde zijn als de brugbreedte (figuur 7b).



Figuur 7 Effect van de tamperbreedte op de folie-explosie

IMP030 - IMP046

Deze metingen zijn voornamelijk uitgevoerd om te onderzoeken of het mogelijk is met de MAP shock-hugoniots te bepalen in het hoge-druk bereik. Voor de besprekking van deze resultaten wordt verwezen naar [11].

IMP055 - IMP057

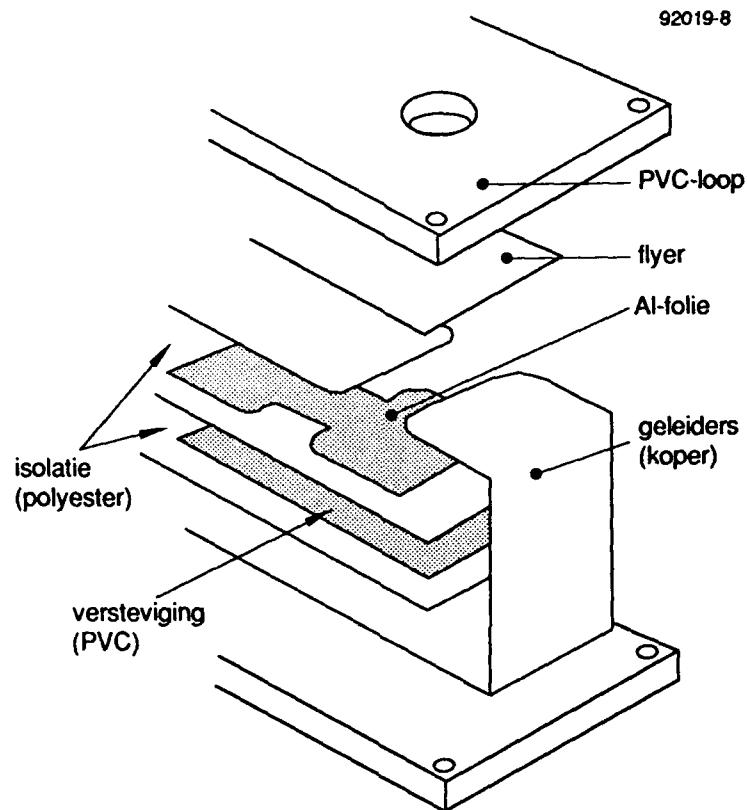
Ook hier betreft het weer een verbetering van de FPA. Het blijkt dat er bij de experimenten met hoge condensatorspanningen (≥ 35 kV) steeds in de onderste koperbaan een gat ontstaat. Berekeningen hebben aangetoond dat dit een gevolg is van de Lorentzkrachten [6]. Bij een 25 kV experiment (folie: 11 mm; 60 μ m; Aluminium) bedraagt de maximale Lorentzkracht al zo'n 15 kN. De vloeigrens van koper wordt hierbij overschreden waardoor het gat ontstaat. Er wordt verondersteld dat de Lorentzkrachten die op het aluminium werken, als gevolg van het ontstaan van dit gat, kleiner zullen worden. Hierdoor kan de snelheid van de flyer lager uitvallen. Om dit te voorkomen is er geëxperimenteerd met dikkere koperbanen. Door gebruik te maken van dikkere koperbanen (200 μ m in plaats van 100 μ m) is dit probleem opgelost. Vanaf deze experimenten is er dan ook gebruik gemaakt van koperbanen van 200 μ m.

IMP058 - IMP059

Om te onderzoeken of de volgorde van plaatsing van het koper en het aluminium bepalend is voor de eindsnelheid zijn er twee experimenten uitgevoerd waarbij het aluminium onder de koperbanen ligt in plaats van er boven (zie figuur 8).

Achterliggende gedachte hierbij is dat de massa van het koper groter is dan dat van het aluminium. Hierdoor zal het aluminium door de Lorentzkrachten tegen het koper worden aangeduwd en blijft er een goede verbinding tussen deze twee componenten bestaan. Uit deze experimenten bleek dat het in deze volgorde inlijmen van de componenten een bijkomend probleem veroorzaakte. De flyer, die plat op het exploderende aluminium moet liggen is veel moeilijker te plaatsen doordat de koperbanen op het aluminium liggen. Daardoor wordt het inlijmen veel moeilijker, wat luchtbellen in de lijmverbinding oplevert. Het effect van deze luchtbellen is in de volgende serie experimenten bepaald.

De gemeten eindsnelheden van deze experimenten liggen zeer hoog. Dit wordt echter veroorzaakt door de onregelmatige vlucht van de flyer. De standaarddeviatie van de fitparameters is zeer groot. De betrouwbaarheid van deze gemeten eindsnelheden moet daarom niet hoog ingeschat worden.



Figuur 8 Flyer Plate Assembly waarbij het aluminium onder het koper geplaatst is

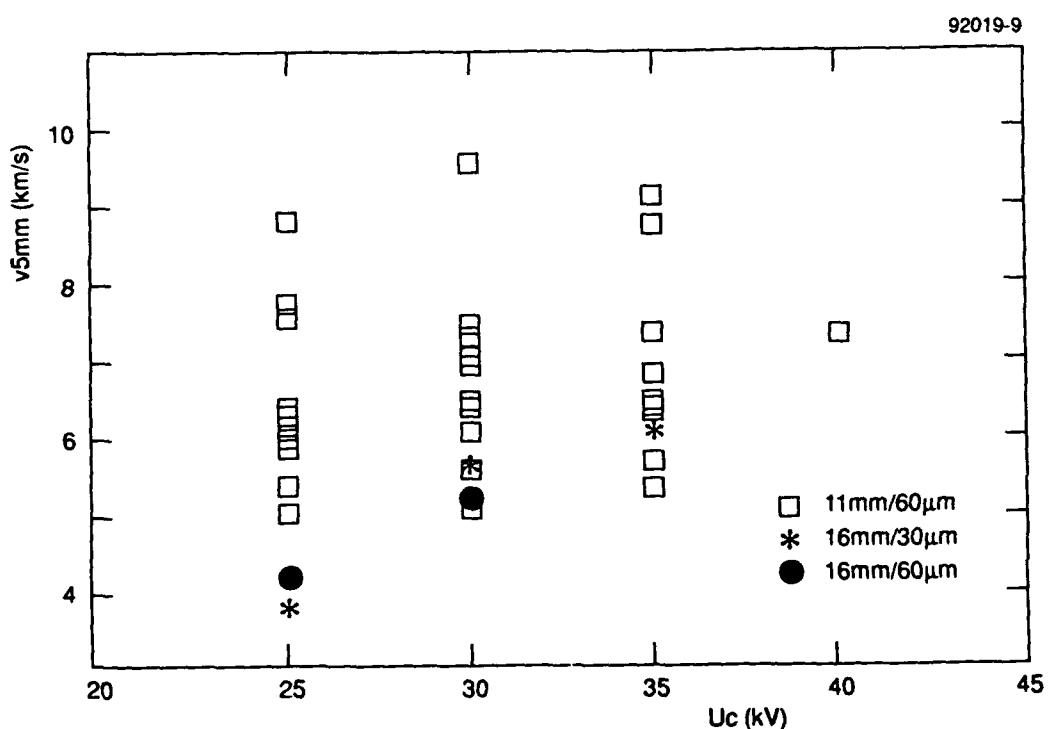
IMP060 - IMP064

Om het effect van de luchtinsluiting te bekijken zijn bij deze serie experimenten FPA's weggeschoten die verschillend van kwaliteit waren. Vóór het wegschieten werd genoteerd waar de luchtbilletjes zich bevonden. Deze blijken zich hoofdzakelijk rond het folie te bevinden. Na de experimenten bleek dat de FPA's waarin zich veel lucht bevond veel zwaarder beschadigd waren dan de FPA met weinig lucht erin. De beschadiging bestond uit meer roet en zwaardere breuk van de steunende PVC platen. Als de weerstand van het folie als gevolg van de opwarming sterk gaat toenemen zal de stroom proberen een traject te volgen waar de weerstand lager is. Hierdoor kan het voorkomen dat de stroom door de luchtbilletjes over het oppervlak van het aluminiumfolie gaat overslaan. Hierdoor raakt de lucht in deze biljetjes sterk geïoniseerd waardoor deze biljetjes exploderen. De flyer wordt dan niet alleen versneld door de folie-explosie maar ook door de exploderende luchtbilletjes. Dit kan de vlakheid van de flyer nadelig beïnvloeden.

IMP065 - IMP075

Deze metingen zijn uitgevoerd voor het bepalen van de flyersnelheid. Ten opzichte van de vorige metingen zijn er geen veranderingen doorgevoerd aan de FPA. Wel wordt er steeds op gelet of er zich geen luchtballetjes bevinden rondom de flyer.

Het is duidelijk dat het door al deze veranderingen aan de FPA moeilijk is om een uitspraak te doen over grootte en reproduceerbaarheid van de flyersnelheid. In figuur 9 worden de gemeten eindsnelheden tegen de oplaadspanning van de condensator getoond.



Figuur 9 Verband tussen oplaadspanning (U_c) en eindsnelheid (V_{5mm})

Toch wordt er geprobeerd een verband te vinden tussen de verschillende parameters om een goede uitspraak te kunnen doen over de te bereiken eindsnelheden met verschillende configuraties.

4.1 Specific Action

Uit onderzoek [12] is gebleken dat voor exploderende ronde stroomgeleiders de hoeveelheid ingevoerde energie tot het moment van explosie constant is en onafhankelijk van de dimensies van de geleider en stroomvorm. Voor exploderende folies daarentegen blijkt deze parameter (specific action) wel afhankelijk te zijn van de stroomvorm en dimensies van het folie. Toch kan de aannname dat voor één soort folie de specific action constant is nuttige informatie opleveren. De specific action wordt als volgt gedefinieerd.

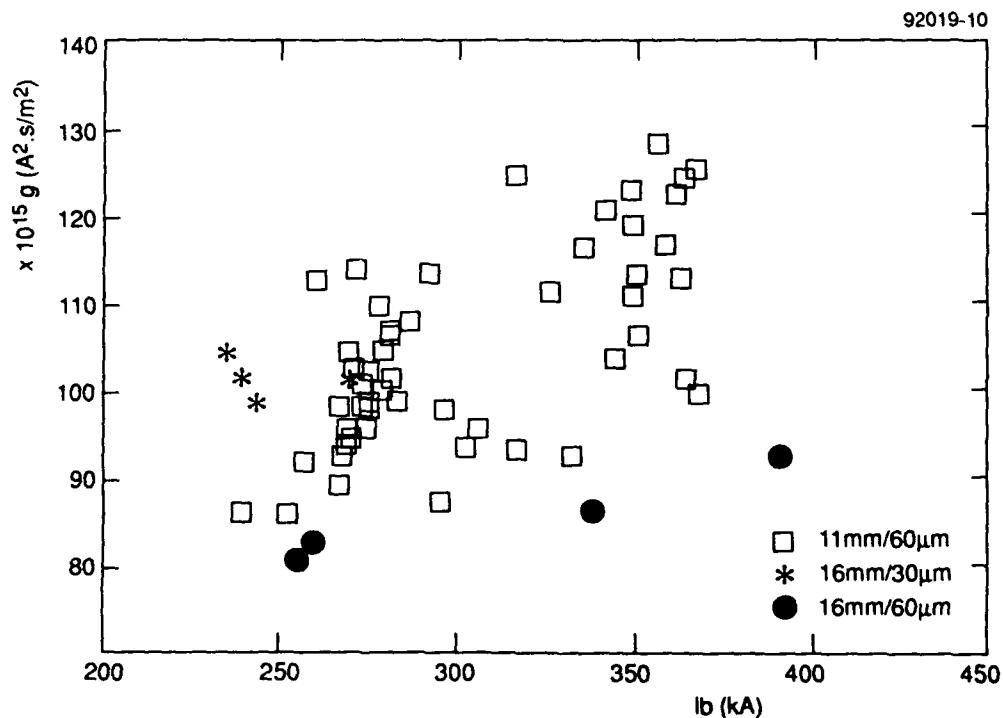
$$g = \int_0^{t_b} J^2(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

Met: g = specific action $[A^2 \cdot s \cdot m^{-4}]$
 t_b = tijd van explosie $[s]$
 $J(\lambda)$ = stroomdichtheidsfunctie $[A \cdot m^{-2}]$

Als de specific action van alle experimenten wordt uitgezet in een grafiek dan blijkt dat deze voor één soort folie redelijk constant is. Bij grotere spanningen is er een lichte toename te zien. Dit wordt veroorzaakt door de veranderende stroomdichtheidsfunctie bij een grotere condensatorspanning. De stijgtijd van de stroom is immers evenredig met de oplaadspanning van de condensator (zie (4)).

Bij een snellere stroomtoename in het folie heeft het folie minder tijd te expanderen. Door de grotere dichtheid van het folie zal het dan langer duren voordat deze explodeert [13].

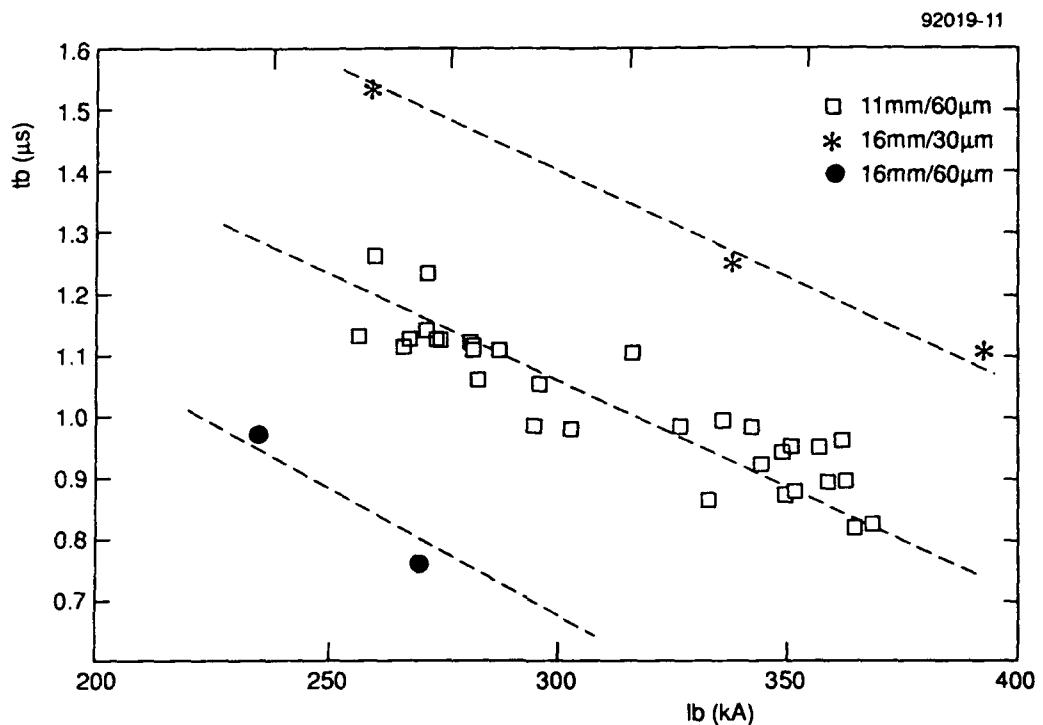
Ook duidelijk waarneembaar is de verschillende specific action voor de verschillende folies. Door de andere dimensies van de folies is de warmtehuishouding anders (figuur 10).



Figuur 10 Specific action (g₀) als functie van de stroom op het moment van explosie (I_b)

Ondanks de verschillende methoden van inlijmen blijkt de specific action van één soort folie redelijk constant te zijn. Als we de tijd tot explosie (t_b) tegen de stroom op het moment van explosie (I_b) uitzetten (figuur 11) blijkt ook hier weer een (redelijk) goed verband te zijn. Als de opladspanning van de condensator groter is zal de stroomstijgtijd groter zijn. Hierdoor wordt er in een kortere tijd meer energie in het folie gevoerd waardoor deze eerder explodeert.

Uit de figuren 10 en 11 kunnen we concluderen dat de manier van inlijmen geen invloed heeft op de folie-explosie en dat de snelheid van de flyer pas beïnvloed wordt door factoren die na de folie-explosie gaan meespelen.



Figuur 11 Tijd tot explosie (t_b) tegen de stroom op het moment van explosie (I_b)

4.2 Opsluiting van het plasma

Het is moeilijk om de omstandigheden die zich voordoen na de folie-explosie nauwkeurig te beschrijven. Er wordt een plasma gevormd dat nog continu verhit wordt door de stroom die er doorheen blijft lopen. Dit plasma expandeert zich waardoor de flyer wordt weggeschoten. Door het expanderen verandert de dichtheid van het plasma. Indien men uitspraken wil doen over het gevormde plasma dan zal de weerstand van het plasma moeten worden gemeten. Dit zal optisch (Kerr cell, Pockels cell) moeten uitgevoerd worden om het systeem niet te verstoren. Daar op dit moment hier de techniek nog niet voorhanden is zal op een ander manier een uitspraak gedaan moeten worden over het plasma.

De weerstand van het plasma dat ontstaat na de explosie van het folie is afhankelijk van de opsluiting [14]. Een plasma met een hoge opslutingsgraad behoudt een grote weerstand, wat resulteert in een snelle uitdemping van stroom. Indien er dus gekeken wordt naar de verhouding

tussen het eerste stroommaximum en het eerste stroomminimum dan wordt er een getal gevonden die een maat is voor de opsluiting van het plasma (9).

Hoe beter de opsluiting is, hoe hoger dit getal zal zijn.

$$P = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (9)$$

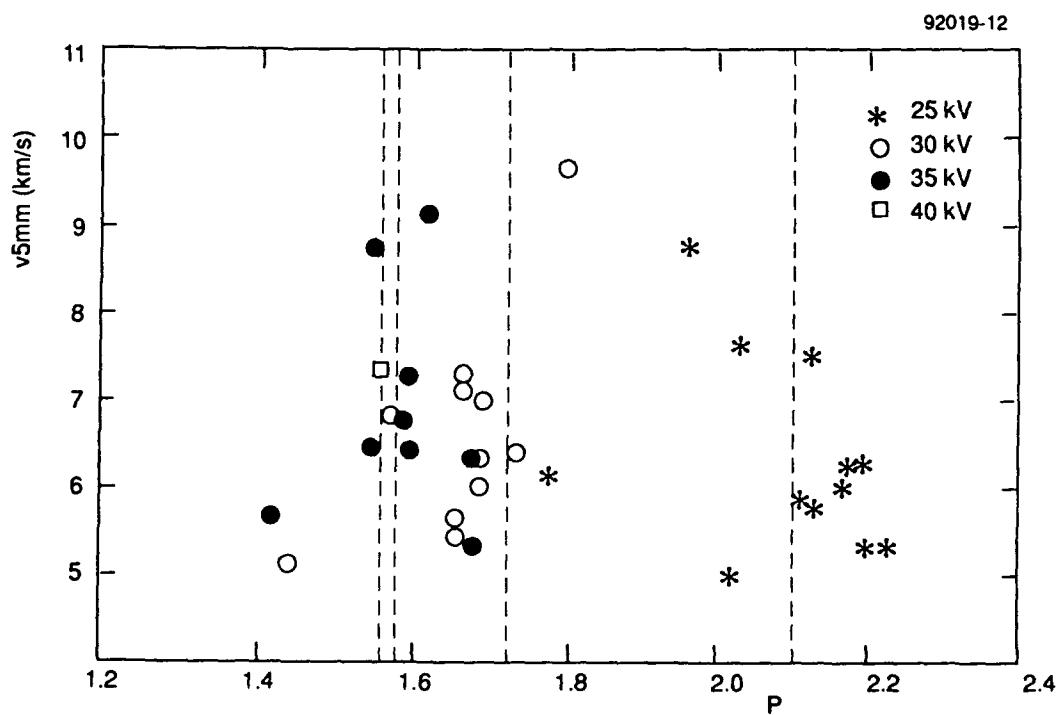
met: I_{\max} = Stroom op het eerste maximum [kA]

I_{\min} = Stroom op het eerste minimum [kA]

Dit opsluitingsgetal P is karakteristiek voor een meting bij een bepaalde spanning. Uit de metingen blijkt dat als een FPA niet goed gelijmd is, er een *lagere* waarde voor deze P wordt gevonden. Dit kan verschillende oorzaken hebben:

- De luchtbelletjes die ingesloten zitten bij slecht gelijmde FPA's kunnen het plasma ruimte geven zich te expanderen. Daardoor wordt de opsluiting minder, hetgeen resulteert in een lagere weerstand.
- Op het moment dat de weerstand van het aluminiumplasma zeer groot wordt kan de stroom een weg gaan zoeken met minder weerstand. Als er zich om het aluminium plasma luchtbelletjes bevinden kunnen deze geïoniseerd raken. De stroom gaat dan door deze luchtbelletjes lopen, hetgeen ook resulteert in een lagere weerstand.
- Als een FPA slecht gelijmd is, kan door de Lorentzkrachten het aluminium zich gaan bewegen voordat de explosie plaatsvindt. Hierbij wordt de lijmverbinding tussen het folie en de tamper verbroken. Op het moment dat het folie explodeert is er al een ruimte gecreëerd onder het folie waardoor ook nu het plasma ruimte heeft zich te expanderen.

Figuur 12 toont een grafiek waarin de eindsnelheid van de flyer is weergegeven tegen de P -waarde. De metingen die hierin zijn opgenomen zijn allemaal uitgevoerd met aluminiumfolie met dezelfde dimensies (11.0 mm; $d = 60 \mu\text{m}$). Hieruit blijkt dat als een meting een P -waarde heeft die ver van het gemiddelde ligt (stippellijn) er ook vaak een afwijkende snelheid wordt gevonden.



Figuur 12 Eindsnelheid van de flyer (v_{5mm}) tegen de opluiting van het plasma (P)

Deze P kan dus gebruikt worden als controlemiddel of de fabricage van de Flyer Plate Assembly correct is geweest. Voor de metingen bij verschillende oplaadspanningen van de condensator worden de volgende waarden voor P gevonden.

Tabel 3 Gemiddelde P-waarde voor diverse configuraties

	25 kV	30 kV	35 kV	40 kV
11mm/60 μ m	2.09	1.74	1.59	1.57
16mm/60 μ m	2.59 ¹	2.09 ¹	1.91 ¹	
16mm/30 μ m	2.43 ¹	1.84 ¹		

¹ Bij deze combinatie van spanning en FPA is er slechts één meting uitgevoerd. Dit getal is dus slechts een richtgetal

De P-waarde van een meting moet binnen deze grenzen vallen. Vooral bij de metingen waarbij is geëxperimenteerd met de verschillende lijmtechnieken wordt vaak een afwijkende waarde gevonden. Hieruit kan geconcludeerd worden dat kwaliteit van de FPA bepalend is voor de bereikte eindsnelheid.

4.3 Gurney Energy

Om nu de eindsnelheid van de flyer toch goed te kunnen relateren aan een parameter is de Gurney Energy berekend [15]. De theorie van Gurney is oorspronkelijk bedoeld om snelheden van explosief versnelde vlakke platen te berekenen. Dit model is door Tucker en Stanton omgewerkt tot een model waarbij vlakke platen versneld wordt door een exploderend folie [16].

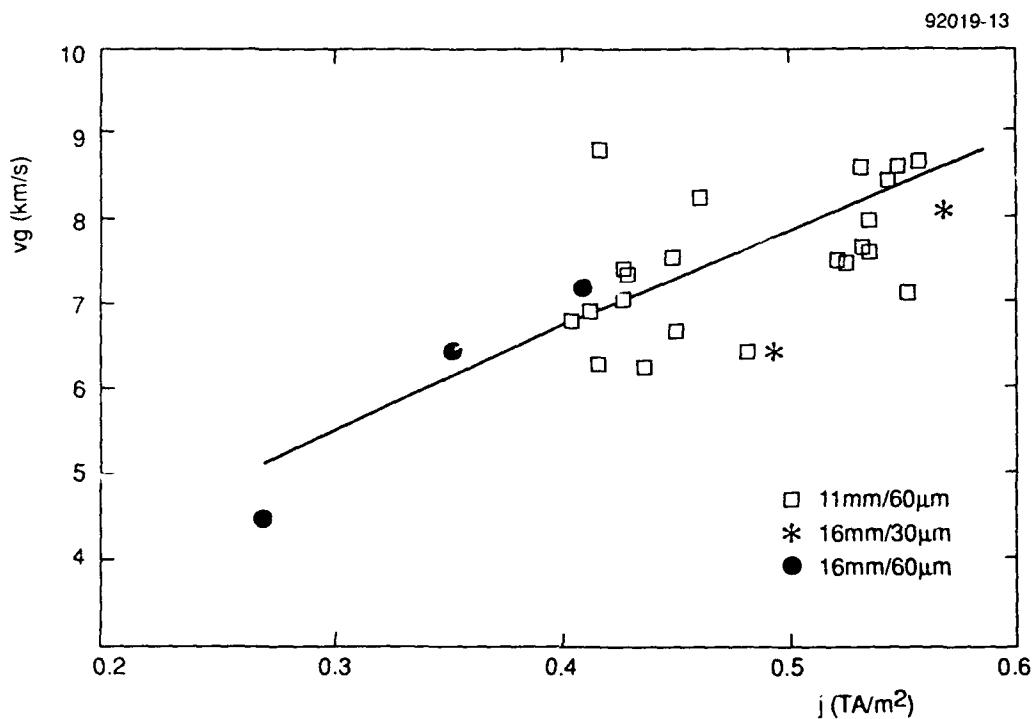
Met de aannname dat de energie die de versnelling aan de vlakke plaat levert alleen bepaald wordt door de stroomdichtheid in het folie op het moment van explosie schreven zij de Gurney vergelijking om naar de volgende vereenvoudigde vorm:

$$V_g = V_f \cdot \sqrt{\frac{M}{C} + \frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$V_g = K \cdot j_B^b \quad (11)$$

met: v_g = gurney-snelheid van de flyer (op een constante afstand);
 v_f = snelheid van de flyer (op een constante afstand);
 j_B = stroomdichtheid op het moment van explosie van het folie;
 M = massa per oppervlakte-eenheid van de flyer plate;
 C = massa per oppervlakte-eenheid van het exploderende folie;
 K = empirisch bepaalde constante (afhankelijk van afstand);
 b = empirisch bepaalde constante.

Figuur 13 toont de Gurney-snelheid van de flyer die uitgezet is tegen de stroomdichtheid op het moment van explosie. Deze vergelijking blijkt een goede parameter te zijn waaraan de eindsnelheid van de flyer te relateren is.

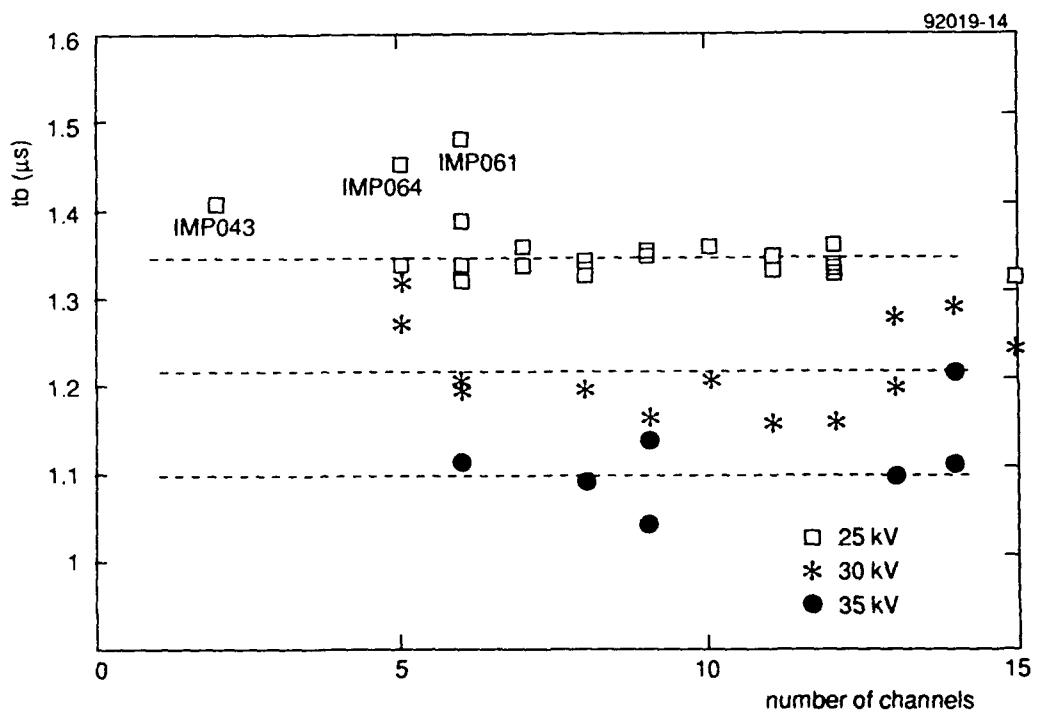


Figuur 13 Eindsnelheid van de flyer vs stroomdichtheid op het moment van explosie

Het voordeel van het relateren van de flyer eindsnelheid aan de Gurney energie is dat er een goede schatting gemaakt kan worden van het effect van gebruik van andere foliediameters. Op basis van deze vergelijking kan verwacht worden dat een verdubbeling van de dikte van het flyer materiaal een afname van de eindsnelheid teweeg zal brengen naar circa 75% van de oorspronkelijke snelheid.

De verwachting dat bij meerder experimenten met dezelfde oplaadspanning van de condensatoren de Gurney-snelheid ook constant is blijkt niet correct te zijn. De oorzaak hiervoor moet gezocht worden in een niet voldoende reproduceerbare ontlading van de condensatoren. Hierdoor varieert de stroom die door het al-folie loopt tijdens een experiment. Het niet reproduceerbaar ontladen kan verschillende oorzaken hebben. We kunnen er van uit gaan dat de capaciteit en oplaadspanning van de condensatoren niet aan verandering onderhevig zijn. Eerder moet gedacht worden aan een veranderende inductie en/of weerstand van het systeem. De inductie kan onder andere veranderen door een slecht functionerende railgap (hoge-spanningsschakelaar). Voor een uitgebreidere toelichting hiervan zie [1]. Een slecht functionerende railgap kan een inductieverhoging van het systeem veroorzaken van $\pm 10\%$. Hierdoor zal de stijgtijd van de stroom 10 % dalen (4). Om dit te

controleren is de burst-tijd (t_b) van het folie uitgezet tegen het functioneren van de railgap. Het functioneren van de railgap kan afgeleid worden uit het aantal vonkoverslagen. Veel vonken zorgen voor een lage inductie. Bij elk experiment is er een foto van de railgap gemaakt. Daarop kan het aantal vonken geteld worden. Er is onderscheid gemaakt tussen grote en kleine vonken. Bij het witzetten in de grafiek hebben we de grote vonken voor twee laten tellen (zie figuur 14).



Figuur 14 Tijd tot explosie van het folie (t_b) uitgezet tegen het aantal vonken in de railgap

Hieruit kunnen we afleiden dat het aantal vonkoverslagen in de railgap niet de tijd tot explosie van het aluminium bepaalt. Er zijn vier experimenten die een afwijkend gedrag vertonen. Meting IMP043 gaf maar één grote vonk. Oorzaak hiervoor was een bijna lege gasfles met SF₆/Argon die gebruikt wordt voor het spoelen van de rail-gap. Meting IMP061 en IMP064 geven een duidelijk langere t_b . Dit wordt veroorzaakt door een overslag tussen de stroomvoerende koperbanen. Na de experimenten waren duidelijk brandsporen op het koper waar te nemen. Door deze overslag is niet alle stroom van de ontlading door het aluminium folie gelopen waardoor het (veel) langer duurt voor deze explodeert.

Een oorzaak voor de grote variatie in de stroom op het moment van explosie (I_b) en daarmee de eindsnelheid is nog niet gevonden. In de toekomst zal geprobeerd worden de spanning over de brug tijdens een experiment te meten. Hiermee kan dan beter gecontroleerd worden hoe de weerstand van het folie verandert tijdens het experiment.

4.4 Resultaten van de snelheidsmetingen

Uit het voorafgaande kan geconcludeerd worden dat een gemeten snelheid omgerekend moet worden naar de Gurney snelheid met behulp van (10). Deze kan dan uitgezet worden tegen de stroomdichtheid op het moment van explosie, nadat er een controle is uitgevoerd naar de opluiting van het plasma met behulp van de berekende P-waarde. Indien de P-waarde bij een bepaalde spanning niet binnen de grenzen valt van de waarden gegeven in tabel 3 dan moet de meting als niet juist worden beschouwd.

Deze metingen kunnen worden gefit met het Gurney model dat is gegeven in (11). Er wordt dan de volgende vergelijking gevonden.

$$V_g = 12.77 \cdot J_b^{0.70} \quad (12)$$

met: J_b = stroomdichtheid op het moment van explosie [TA/m^2]

Let wel dat deze gevonden parameters gelden voor een loop van 5 mm lengte.

Er zijn verder nog een paar bijzonderheden die vermelding waard zijn. Bij enkele metingen waar het aluminium onder de koperbaan ligt zijn zeer hoge snelheden gemeten (IMP058, IMP069). Dit kan verschillende oorzaken hebben. Ten eerste dient opgemerkt te worden dat deze snelheidsmetingen een zeer grillig verloop vertonen. Hierdoor is het fitten vaak onnauwkeuriger, hetgeen hogere snelheden kan opleveren. Een theorie is echter ook dat het aluminium, omdat het onder het zwaardere koper is geplaatst, zich minder goed kan verplaatsen. Onder invloed van de Lorentzkrachten verplaatst het aluminium zich immers vóór de explosie. Hierdoor creëert het een ruimte die gevuld wordt door het plasma na de explosie. Hoe kleiner de ruimte is voor de explosie, des te groter de druk die door de explosie van het folie wordt veroorzaakt. Dit kan resulteren in een hogere snelheid. Verder is het opmerkelijk dat de tijd tot explosie (t_b) aanmerkelijk korter is dan bij overeenkomstige metingen met een andere configuratie. Dit bevestigt de theorie dat door het aluminium aan de onderkant van het koper te plaatsen de overgang tussen het koper en het aluminium beter contact houdt. Als laatste

dient opgemerkt te worden dat het lijmen van deze FPA extra moeilijkheden met zich meebrengt. Er bevinden zich veel luchtbolletjes rond het folie. Deze exploderen ook mee, hetgeen het onregelmatige verloop van de meting verklaart. De flyer zal als gevolg hiervan sterk vervormd zijn.

Verder is het opmerkelijk dat bij een toename van de condensatorspanning van 25-40 kV de snelheidstoename minder groot is dan men zou verwachten. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door de drukopbouw voor de flyer in de loop. Door die drukopbouw kan de flyer een soort 'maximum snelheid' bereiken waarna de druk die de flyer moet overwinnen zo groot wordt dat verdere versnelling niet mogelijk is. Om dit te verifiëren zullen experimenten in vacuüm moeten worden uitgevoerd.

De relatief kleine snelheidstoename bij een hogere condensatorspanning zou ook kunnen worden veroorzaakt worden door de Lorentzkrachten. Door de snellere stroomtoename bij hogere condensatorspanningen kan het folie meer gaan bewegen voor de explosie. Hierdoor wordt er meer ruimte gecreëerd zodat na de folie-explosie de druk lager is.

4.5 Resultaten van de vlakheidsmetingen

De vlakheidsmetingen zijn tot nu toe alleen uitgevoerd bij 25 kV. Met elk folie volgens de dimensies zoals vermeld in tabel 2 is er een vlakheidsmeting uitgevoerd. De spreiding in de aankomsttijden is niet van dien aard dat er van scheef vliegen gesproken kan worden. Het is namelijk niet zo dat de flyer duidelijk naar een kant overhelt. Eerder is er sprake van een vervorming van de flyer.

In de literatuur is er vaak sprake van een zadelvorming [17]. Doordat er elektromagnetische krachten op het folie werken voordat deze verdampst gaat deze bol staan. Na de verdamping van het folie heeft de flyer ook deze vorm. In de hier uitgevoerde vlakheidsmetingen is deze zadelvorming niet waar te nemen. Er kan geen duidelijk patroon gevonden worden in de aankomsttijden van de flyer op de fibers.

Het maximale tijdsverschil in aankomsttijden bedraagt bij de verschillende flyerconfiguraties respectievelijk 34, 62 en 24 ns. Als hierbij de eindsnelheid van de flyer in acht wordt genomen geeft dat een afstandsverschil van 170, 236 en 99 μ m. De flyerdikte bedraagt 125 μ m. Dat wil dus zeggen dat de maximale vervorming twee keer de dikte van de flyer bedraagt. De maximale vervorming (236 μ m) treedt op bij de flyerconfiguratie met een foliebreedte van 16 mm. Relatief gezien is de vervorming hier dus kleiner dan bij de vervorming van 170 μ m. De vervorming kan ook uitgedrukt worden in een maximale hoek waaronder de flyer vliegt. Deze bedraagt voor de drie verschillende configuraties dan 0.97°, 0.90° en 0.57°.

5

DISCUSSIE

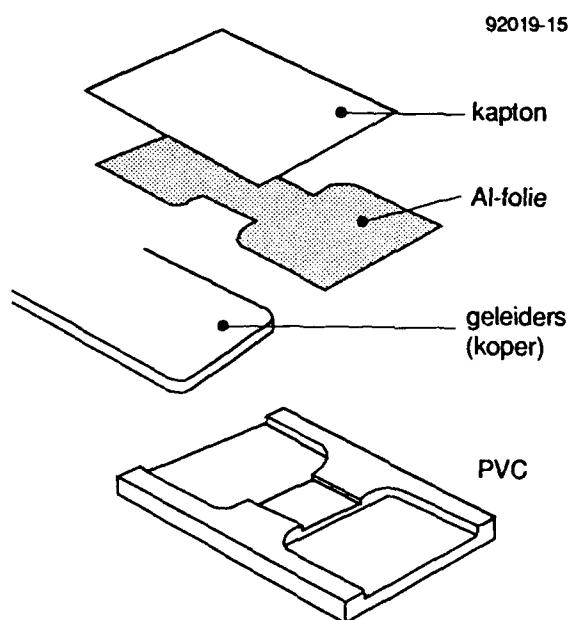
Bij de bespreking van de resultaten zijn al enkele opmerkingen gemaakt omtrent mogelijke verbeteringen aan het meetsysteem en de FPA. Deze verbeteringen zullen in de praktijk getoetst moeten worden. Een opsomming van de mogelijkheden volgt hieronder.

5.1. Verbeteringen aan de FPA

Tijdens de experimenten is getracht het effect van verschillende factoren op de snelheid en vlakheid van de flyer te bepalen. Hieruit zijn enkele conclusies getrokken die op hun beurt weer hebben geleid tot de ontwikkeling van een nieuw type FPA. Hieronder worden als eerste de verschillende factoren beschreven die invloed hebben op de vlucht van de flyer.

- *De lijm moet isolerend zijn.* Bij niet-isolerende lijmen kunnen er overslagen plaatsvinden over het oppervlak tussen de flyer en het aluminium. Dit zal zich voornamelijk voor doen als de weerstand van het aluminium zeer veel gestegen is ten gevolge van de opwarming. Hierdoor explodeert het folie minder snel wat kan leiden tot snelheidsverlies en scheef vliegen van de flyer.
- *De lijmlaag moet zeer dun en reproduceerbaar van dikte zijn.* Na de explosie van het folie wordt de flyer versneld. Aan de flyer zullen zich nog resten van de lijmlaag bevinden (deze explodeert immers niet). Volgens (10) is de snelheid van de flyer afhankelijk van de massa per oppervlakte-eenheid van de flyer. Een dikke lijmlaag resulteert in een lagere snelheid. Om de dikte van de lijmlaag reproduceerbaar te maken wordt de FPA na het inlijmen onder een pers geplaatst waar deze 24 uur kan drogen.
- *De lijmlaag mag geen luchtbellen bevatten.* Als er lucht ingesloten zit rond het aluminium kan dit twee gevolgen hebben. Over het oppervlak van het aluminium wat aan de luchtbellen grenst kunnen vonkoverslagen plaatsvinden. Daarnaast veroorzaken de luchtbellen na de explosie van het plasma een drukverlies omdat het plasma in deze holten kan vloeien. Een experiment waarbij dit gebeurt is herkenbaar aan de vele brandsporen.
- *De dikte van de onderste koperbaan moet toereikend zijn om de Lorentzkracht op te vangen.* De Lorentzkracht die op het moment van explosie op de flyer en de onderste koperbaan staan bedragen bij een 25 kV experiment ($a = 8.9 \text{ mm}$; $d = 60 \mu\text{m}$) circa 15 kN [6]. Door deze grote kracht wordt de vloeigrens van koper overschreden waardoor er een gat in de onderste koperbaan ontstaat. Hierdoor wordt de werking van de Lorentzkracht opgeheven, wat resulteert in een lagere snelheid.

De nieuwe FPA die is ontwikkeld voldoet aan de bovenstaande punten. De FPA bestaat nog maar uit 5 componenten. Uit een plaatje slagvast PVC worden de vormen van de koperbanen en de aluminium brug gefreesd. Door het verzinken van het koper en de brug is de opluiting van het plasma optimaal. De kapton flyer wordt met epoxylijm op de brug gelijmd en vervolgens onder een pers geplaatst.



Figuur 15 Ontwerp nieuwe Flyer Plate Assembly

5.2 Verbeteringen aan de snelheidsmeting

Voor een meer nauwkeuriger bepaling van de eindsnelheid zal de methode aangepast moeten worden. Hierbij kan gedacht worden aan een continue snelheidsmeting, zoals een Fabry Perot Interferometer of een aanpassing van de bestaande meting. Mogelijkheden hierbij zijn:

- De zes fibers alleen aan het eind van de loop positioneren (bijvoorbeeld op 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 en 5.0 mm). Hierbij wordt een goed beeld verkregen van de eindsnelheid maar niet van de snelheidontwikkeling.
- De schokgolfsnelheid in een doelmateriaal meten en daaruit de snelheid van de flyer afleiden. Hiervoor zijn de Hugoniots van het flyer- en doelmateriaal nodig. De Hugoniots die beschikbaar zijn [18] liggen in snelheid- en drukbereiken die veel lager zijn dan die bij de MAP gerealiseerd worden. Extrapolatie van de Hugoniots is daarom nodig, waardoor de betrouwbaarheid aanzienlijk afneemt. Ook hier wordt alleen informatie over de eindsnelheid verkregen.
- Niet de eindsnelheid maar de snelheid van de flyer halverwege de loop bepalen. Het is dan niet nodig om een extrapolatie uit te voeren na het fitten. Nadeel hiervan is dat, wanneer de MAP gebruikt gaat worden voor bijvoorbeeld initiatiemeting, de eindsnelheid van de flyer toch bekend moet zijn.

6 CONCLUSIES

Dit rapport zet alle metingen die tot nu toe zijn uitgevoerd met de TNO-Mega Ampère Pulser nog eens op een rijtje, met als doel een opsomming geven van alle factoren die de eindsnelheid van de flyer beïnvloeden.

Hiertoe worden de beperkingen van de verschillende meetmethoden toegelicht. De grootste fout komt uit de snelheidsmeting. Het aantal fibers (6 stuks), de positionering hiervan en de gebruikte fitmethode beïnvloeden de betrouwbaarheid van de hieruit afgeleide eindsnelheid in belangrijke mate.

Verder speelt het gebrek aan een spannings/weerstandsmeting tijdens de experimenten een belangrijke rol. Hierdoor is het moeilijk uitspraken te doen over het verloop van de folie-explosie. In de toekomst zal daarom een goede spanningsmeting ontwikkeld moeten worden.

Verder beïnvloedt de constructie van de FPA in belangrijke mate de eindsnelheid. Factoren als ingesloten luchtbolletjes, lijmlagen van variabele dikte, de opluiting van het plasma en de te gebruiken dikten van de koperbanen kunnen nu allemaal in de hand gehouden worden als er van de nieuw ontwikkelde FPA gebruik gemaakt gaat worden.

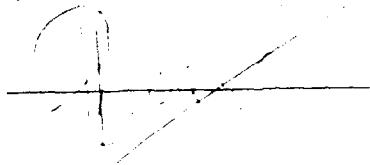
Allereerst zal hier een snelheidscalibratie mee uitgevoerd moeten worden. Speciale aandacht moet daarbij liggen op de reproduceerbaarheid van de eindsnelheden. Bij deze metingen dienen de fibers aan het einde van de loop geplaatst te worden of (veel beter) moet een interferometrische snelheidsmeting ontwikkeld worden.

Ook moet bij deze snelheidscalibratie geschoten worden met flyers van verschillende dikten om zo een grotere variatie in de te bereiken eindsnelheden te verkrijgen. Met de Gurney vergelijking kan dan een ijkcurve voor de eindsnelheden gemaakt worden. Hiermee wordt de MAP een uitermate geschikt instrument voor diverse toepassingen waarbij exact gedefinieerde drukpulsen noodzakelijk zijn.

ONDERTEKENING

M.P. van Rooijen

(auteur)



Dr. A.C. van der Steen

(projectleider)



8 LITERATUUR

- 1 Prinse, W.C.
Ontwerp, constructie en mogelijkheden van de TNO-MAP, PML-TNO, Rijswijk, Nederland,
Intern rapport.
- 2 Rooijen, M.P. van
Construction of the Flyer Plate Assembly, 1st Progress Meeting, Cooperation Universidade de
Coimbra and TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, The Netherlands, 5 - 6 March 1992.
- 3 Zöllner, H.
Untersuchungen zur Stoßinitiierung von Sprengstoffen bei Beschuß mit elektrisch beschleunig-
ten Folien, Dissertation, Universität Düsseldorf, Deutschland, 1986.
- 4 Weingart, R.; Chau, H.; e.a.
The Electric Gun: a versatile tool for high-pressure shock wave research, Rev. Sci. Instrum. 12
(51), p. 1676-1681, 1980.
- 5 Richardson, D.D.; Northeast, E.D.; Ryan, P.F.X.
An exploding foil flying plate generator, Department of Defence, Materials Research
Laboratory, Melbourne, Australia, 1988.
- 6 Roestenburg, R.J.
De elektrodynamische aspecten van de Electric Gun, Intern rapport, PML-TNO, Rijswijk,
Nederland, juni 1992.
- 7 Meer van Houtum, P.G. van der
De Electric Gun als meetobject, Intern rapport, PML-TNO, Rijswijk, Nederland, 1990.
- 8 Harlan, J.G.; Rice, J.K.; Rogers, J.W.
The role of air and other gases in flyer plate initiation of explosives, Sandia National
Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

- 9 Chau, H.H.; McMilan, C.F.; Osher, J.E.
Application of Fabry-Perot velocimeter to high-speed experiments, UCRL-98483 PREPRINT,
Lawrence Livermore National Laboratory, August 1988.
- 10 Mertens, L.P.
Optimalisatie van de Electric Gun, Intern rapport, PML-TNO, Rijswijk, Nederland, juni 1992.
- 11 Griend, M. van der
Shock Hugoniot bepalingen met behulp van de Electric Gun, Intern rapport, PML-TNO,
Rijswijk, Nederland, november 1991.
- 12 Tucker, T.J.
Behaviour of Exploding Gold Wires, J. Appl. Phys. 32, 1894 (1961).
- 13 Lee, R.S.
Simple Models for Electric Gun operating Characteristics, HDP 1989.
- 14 Higgins, P.B.
A convenient method of increasing the circuit damping produced by an exploding foil, Rev. Sci.
Instrum., Vol. 45, No. 4, April 1974.
- 15 Gurney, R.W.
Rept-405, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH (1943).
- 16 Tucker, T.J.; Stanton, P.L.
Rept. SAND 74-0244, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, (1975).
- 17 Von Holle, W.G.; Lee, R.E.; Chau, H.
New diagnostics for the characterization of slapper detonators, Lawrence Livermore National
Laboratory, Livermore, USA, March 1988.
- 18 Marsh, S.P. (Editor)
LASL Shock Hugoniot Data, University of California Press,
Berkeley - Los Angeles - London, 1980.

BIJLAGE 1 OVERZICHT VAN DE MEETRESULTATEN

meting	V [kV]	st [mm]	a [mm]	d [mm]	loop [mm]	P1 [kA]	P2 [kA]	Iburst [kA]	P1/P2	Int(I2) [A2s]	t=0 [μs]	a0	tau	v[5mm] [km/s]
INDU05	25	mm	-	-	-	-	-	-	1.09	-	-	-	-	-
INDU06	30	mm	-	-	-	398.3	324.9	398.3	1.23	-	-	-	-	-
INDU07	25	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INDU08	25	mm	-	-	-	321.0	268.6	321.0	1.19	-	-	-	-	-
INDU09	25	mm	-	-	-	325.9	251.9	325.9	1.29	-	-	-	-	-
INDU10	25	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INDU12	25	mm	-	-	-	329.4	256.3	329.4	1.29	-	-	-	-	-
INDU14	25	mm	-	-	-	332.0	276.2	332.0	1.20	-	-	-	-	-
INDU15	25	mm	11	60	8.9	278.4	138.1	271.4	2.02	44563	1.356	49.94	0.100	4.99
IMP001	25	sm	11	60	8.9	246.6	120.4	238.8	2.05	37549	1.456	-	-	-
IMP002	25	sm	11	60	8.9	296.1	178.1	296.1	1.66	42650	1.270	43.21	0.131	5.64
IMP003	30	sm	11	60	8.9	352.1	226.7	349.1	1.55	48215	1.088	34.24	0.190	6.45
IMP005	25	sm	16	60	13.8	290.6	127.9	255.3	2.27	74591	1.736	-	-	-
IMP006	25	sm	16	60	13.8	294.1	113.5	259.5	2.59	76263	1.746	18.27	0.209	3.81
IMP007	30	sm	16	60	13.8	349.8	167.2	338.1	2.09	79667	1.464	16.51	0.340	5.45
IMP008	35	sm	16	60	13.8	397.8	207.7	391.9	1.91	85362	1.324	22.66	0.273	6.07
IMP009	25	sm	16	30	13.8	245.8	108.0	242.6	2.28	22730	1.080	-	-	-
IMP010	25	sm	16	30	13.8	238.4	98.0	235.4	2.43	24049	1.188	27.64	0.149	4.12
IMP011	25	sm	16	30	13.8	245.1	107.0	239.2	2.29	23300	1.118	-	-	-
IMP012	30	sm	16	30	13.8	272.9	148.5	270.4	1.84	23393	0.974	17.61	0.298	5.17
IMP013	25	sm*	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IMP014	25	sm*	11	60	8.9	280.7	130.7	273.0	2.15	43790	1.318	-	-	-
IMP015	25	sm*	11	60	8.9	279.6	125.9	274.1	2.22	44406	1.344	25.37	0.210	5.31
IMP016	25	sm	11	60	8.9	293.2	134.0	287.3	2.19	46938	1.326	19.54	0.275	5.30
IMP017	25	sm	11	60	8.9	288.0	133.2	281.5	2.16	46322	1.330	18.18	0.340	5.96
IMP018	25	sm	11	60	8.9	286.9	132.5	281.5	2.17	46496	1.332	18.86	0.345	6.23
IMP019	25	sm	11	60	8.9	277.1	130.3	266.8	2.13	42839	1.330	19.39	0.304	5.76
IMP020	25	sm	11	60	8.9	266.1	131.0	256.9	2.03	40026	1.348	14.88	0.635	7.62
IMP021	35	sm	11	60	8.9	359.8	224.4	358.7	1.60	50769	1.108	25.48	0.297	7.26

(Vervolg)

meting	V [kV]	set	a [mm]	d [mm]	loop	P1 [kA]	P2 [kA]	Iburst [kA]	P1/P2	Int(I2) [A2s]	t=0 [μs]	a0	tau	v[5mm] [km/s]
IMP022	25	sm	11	60	8.9	287.7	122.6	278.2	2.35	47755	1.352	-	-	-
IMP023	25	sm	11	60	8.9	299.0	161.4	292.4	1.85	49309	1.338	-	-	-
IMP024	25	sm	11	60	8.9	278.9	149.0	269.4	1.87	45478	1.356	-	-	-
IMP025	25	sm	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IMP026	25	sm	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IMP027	35	sm	11	60	8.9	359.0	225.1	351.0	1.60	46309	1.094	44.19	0.153	6.75
IMP028	35	sm	11	60	8.9	343.7	220.7	332.7	1.56	40281	1.082	17.18	0.675	8.71
IMP029	25	shp	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IMP030	25	shp	11	60	8.9	284.4	133.6	279.3	2.13	43496	1.334	-	-	-
IMP031	25	shp	11	60	8.9	279.6	148.2	273.8	1.89	42906	1.324	-	-	-
IMP032	25	sha	11	60	8.9	269.0	144.6	268.6	1.86	41741	1.318	-	-	-
IMP033	25	sha	11	60	8.9	276.0	122.6	270.5	2.25	41272	1.318	-	-	-
IMP034	35	sha	11	60	8.9	377.0	231.7	367.8	1.63	54520	1.128	-	-	-
IMP035	25	shp	11	60	8.9	257.7	135.4	251.8	1.90	37320	1.386	-	-	-
IMP036	25	shp	11	60	8.9	280.4	149.0	272.7	1.88	42853	1.322	-	-	-
IMP037	25	shp	11	60	8.9	269.0	144.6	266.8	1.86	38820	1.334	-	-	-
IMP038	25	shp	11	60	8.9	273.4	150.8	268.6	1.81	40977	1.334	-	-	-
IMP039	25	sm	11	60	8.9	272.3	152.6	267.9	1.78	40334	1.342	15.88	0.410	6.12
IMP040	25	sha	11	60	8.9	277.4	124.4	273.8	2.23	42705	1.356	-	-	-
IMP041	25	sm	11	60	8.9	284.7	130.3	281.1	2.19	44045	1.338	17.54	0.377	6.27
IMP042	25	sm	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	18.76	0.342	6.16
IMP043	25	sha	11	60	8.9	239.0	115.2	237.6	2.07	96414	1.406	-	-	-
IMP044	25	sha	11	60	8.9	285.6	131.3	279.1	2.18	45525	1.386	-	-	-
IMP045	30	sha	11	60	8.9	306.2	168.9	306.0	1.81	41669	1.246	-	-	-
IMP046	35	sha	11	60	8.9	360.7	231.2	349.4	1.56	51749	1.212	-	-	-
IMP047	25	sha	11	60	8.9	-	-	-	2.24	-	1.384	-	-	-
IMP048	25	sha	11	60	8.9	-	-	-	1.93	-	1.598	-	-	-
IMP049	25	shc	11	60	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IMP050	25	shc	11	60	8.9	-	-	-	1.99	-	1.620	-	-	-
IMP051	30	sha	11	60	8.9	-	-	-	2.06	-	1.374	-	-	-
IMP052	30	sha	11	60	8.9	-	-	-	1.94	-	1.230	-	-	-

(Vervolg)

meting	V [kV]	srt	a [mm]	d [mm]	loop [mm]	P1 [kA]	P2 [kA]	Iburst [kA]	P1/P2	Int(I2) [A2s]	t=0 [μs]	a0	tau	v[5mm] [km/s]
IMP053	35	sha	11	60	8.9	-	-	-	1.60	-	1.164	-	-	-
IMP054	35	sha	11	60	8.9	-	-	-	1.76	-	1.160	-	-	-
IMP055	35	sm	11	60	8.9	-	-	-	1.69	-	1.152	24.79	0.216	5.33
IMP056	35	sm	11	60	8.9	357.4	222.6	350.6	1.61	49336	1.168	23.99	0.274	6.42
IMP057	40	sm	11	60	8.9	396.1	252.5	364.7	1.57	44101	1.036	27.68	0.274	7.33
IMP058	25	sm	11	60	8.9	277.6	130.8	274.6	2.12	41669	1.344	28.67	0.270	7.46
IMP059	30	sm	11	60	8.9	295.2	169.4	294.9	1.74	38021	1.202	27.55	0.235	6.39
IMP060	35	sm	11	60	8.9	351.5	208.7	344.3	1.68	45115	1.138	44.52	0.142	6.32
IMP061	25	sm	11	60	8.9	275.4	140.3	260.3	1.96	48986	1.478	12.36	0.863	8.74
IMP062	30	sm	11	60	8.9	341.9	235.9	335.8	1.45	50603	1.208	19.81	0.261	5.12
IMP063	35	sm	11	60	8.9	396.7	278.4	262.7	1.42	49066	1.112	19.54	0.296	5.67
IMP064	25	sm	11	60	8.9	281.4	133.6	271.8	2.11	49529	1.450	20.61	0.290	5.85
IMP065	30	sm	11	60	8.9	304.2	179.1	302.9	1.70	40690	1.198	18.34	0.414	6.98
IMP066	30	sm	11	60	8.9	328.1	207.6	326.4	1.58	48386	1.198	34.71	0.198	6.81
IMP067	30	sm	11	60	8.9	283.5	111.6	282.9	2.54	42937	1.278	31.03	0.239	7.26
IMP068	35	sm	11	60	8.9	388.5	238.6	368.5	1.63	43405	1.042	17.86	0.697	9.09
IMP069	30	sm	11	60	8.9	316.9	175.2	316.9	1.81	40664	-	18.20	0.782	9.60
IMP070	30	sm	11	60	8.9	350.6	209.5	349.1	1.67	53484	1.158	17.78	0.457	7.26
IMP071	30	sm	11	60	8.9	357.1	213.2	356.7	1.68	55760	1.166	19.60	0.393	7.11
IMP072	30	sm	11	60	8.9	365.8	222.1	364.1	1.65	54053	1.158	*	*	*
IMP073	30	sm	11	60	8.9	353.6	214.7	361.7	1.69	53295	1.178	25.68	0.237	6.01
IMP074	30	sm	11	60	8.9	342.7	202.7	342.1	1.69	52488	1.198	24.05	0.269	6.35
IMP075	30	sm	11	60	8.9	317.9	191.0	316.2	1.66	54148	1.318	43.78	0.124	5.43

REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD NL)

1 DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD92-2751	2. RECIPIENTS ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER PML 1992-113
4. PROJECT/TASK/WORKUNIT NO. 221492019	5. CONTRACT NUMBER A84/KL/147	6. REPORT DATE March 1993
7. NUMBER OF PAGES 42 (1 Annex)	8. NUMBER OF REFERENCES 18	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Velocity measurements on the Electric Gun developed at the TNO Prins Maurits Laboratory (Snelheidheidsmetingen aan de bij het Prins Maurits Laboratorium ontwikkelde Electric Gun)		
11. AUTHOR(S) M.P. van Rooijen		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) DMKL P.O. Box 90822, 2509 LV The Hague		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation: ONGERUBRICEERD is equivalent to: UNCLASSIFIED		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) During the period 1989-1991 at PML-TNO a Mega Ampère Pulser was developed. This instrument is capable of accelerating thin flat plastic plates to velocities ranging 1-10 km/s. Extensive research was conducted on the construction on of the Flyer Plate Assembly (FPA), the system that launches the flyer. The influence of different parameters on the flyer movement was examined by measuring velocity and flatness of the flyer. The confinement of the plasma after explosion, the construction techniques of the FPA and the method of measuring the velocity are the main causes for a disturbed flyer movement. Based on the experimental results, a new FPA is proposed for which a new velocity calibration is needed.		
16. DESCRIPTORS Electric Guns Velocity Measurement		IDENTIFIERS Flyers Flyer Plate Assembly
17A. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) ONGERUBRICEERD	17B. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) ONGERUBRICEERD	17C. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) ONGERUBRICEERD
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17D. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) ONGERUBRICEERD

Distributielijst

- 1 DWOO
- 2 HWO-KL
- 3/4 HWO-KLu
- 5 HWO-KM
- 6 DMKL
J.A. van Gool
- 7/9 TDCK
- 10 Hoofddirecteur DO-TNO
- 11 Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. drs. P.J. van den Berg
- 12 Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. ir. M.A.W. Scheffelaar
- 13 Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. ir. H. Wittenberg
- 14 PML-TNO, Directeur; daarna reserve
- 15 PML-TNO, Directeur Programma; daarna reserve
- 16 PML-TNO, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid,
Hoofd Groep Eigenschappen Energetische Materialen
- 17/18 PML-TNO, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid,
Groep Eigenschappen Energetische Materialen
- 19 PML-TNO, Documentatie
- 20 PML-TNO, Archief